

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 2 5 年 5 月 2 3 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究（S）

研究期間：2008年度～2012年度

課題番号：20226018

研究課題名（和文）革新的な核融合炉点火領域を目指した超高密度プラズマの生成と制御

研究課題名（英文）Production and Control of Super-Dense Plasmas towards an Innovative Ignition Regime for a Fusion Reactor

研究代表者

山田弘司（YAMADA Hiroshi）

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号：20200735

研究成果の概要（和文）：本研究では、大型ヘリカル装置実験で得られた高密度高性能プラズマの閉じ込め特性をモデル化し、物理相似性を利用して自己燃焼プラズマへ外挿することによって、在来の制御熱核融合の点火シナリオよりも高密度低温で点火を行うシナリオの実現可能性を示した。このような高密度点火シナリオは、プラズマ中心部に直接燃料を供給することが条件となるが、運転温度や核融合出力を低減させることが出来るため、プラズマ対向材料への高熱負荷などの困難な工学的要求を緩和させることが可能である。

研究成果の概要（英文）：High-density and high-performance plasma, which was identified in the Large Helical Device, has been extrapolated to self-burning plasmas by assuming a dimensional physical similarity. And the feasibility of an innovative scientific model, which enables access to the self-burning regime with relatively high-density and low-temperature conditions compared to the conventional burning scenario in the thermo-nuclear fusion, has been corroborated. While the direct fueling to the core plasma is inevitable for the realization of the proposed scenario, it allows to mitigate engineering demands such as extreme high heat flux onto the plasma facing materials by reducing the plasma temperature and the minimum fusion output to sustain self-burning plasma.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	45,300,000	13,590,000	58,890,000
2009年度	44,000,000	13,200,000	57,200,000
2010年度	20,900,000	6,270,000	27,170,000
2011年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
2012年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
総計	122,200,000	36,660,000	158,860,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・核融合学

キーワード：プラズマ・核融合、物性実験、燃料供給効率、ペレット入射、排気

## 1. 研究開始当初の背景

超高密度低温での炉心プラズマ運転は、深刻な壁熱負荷を軽減させ、核融合反応生成物であるアルファ粒子を含めてプラズマの閉じ込め特性に優れた革新的な運転領域を可能とし、核融合実証炉の実現への要件を緩和しうる。本研究グループは大型ヘリカル装置

（LHD）をプラットフォームとして利用した固体水素ペレット入射による高効率燃料供給実験研究において、粒子拡散が抑制される運転条件を見出し、プラズマ密度を核融合臨界条件の10倍になる1000兆個/ccまで上昇させることに成功した。

## 2. 研究の目的

本研究は在来型の高温低密度での制御熱核融合点火のシナリオとは異なった超高密度低温で点火を行う科学的モデルを提示することを目的としており、従来の温度2億度、密度150兆個/ccという点火条件の目安に対して、工学的要求を画期的に下げることのできる革新的な制御熱核融合点火シナリオの提示を目指す。このような高密度運転シナリオは、国際熱核融合実験炉（ITER）に代表されるトカマク型では決して実現できない運転領域の確立であり、代替方式であるヘリカル型の長を基礎学術的な取り組みによって最大限に活かすものとなる。

## 3. 研究の方法

大容量かつ繰り返し可能な高性能固体水素ペレット入射装置を開発し、大型ヘリカル装置に導入する。固体水素ペレット入射を用いた高温プラズマへの粒子供給実験を行うことによって、超高密度プラズマの定常保持実証と密度限界の同定を行う。実験データの取得、解析に当たっては理解及びモデルの外挿性を担保することに留意し、半経験的な相似則を導き出すことによって、核融合プラズマにおける燃焼シナリオを提示する。

## 4. 研究成果

### 4-1. 装置開発研究

本研究開始後の1, 2年目は、研究遂行上必須な粒子供給装置、すなわち、固体水素ペレット入射装置群および超音速ガスバフ/クラスタービーム入射装置を開発・製作するとともに、既設設備を利用しつつ本研究による製作を合わせてシステム化し、実験に供する整備を重点的に行った。開発・利用した固体水素ペレット入射装置群は(1)20連発ペレット入射装置(主装置)、(2)スクリーウ押し出し方式ペレット入射装置、(3)メカニカルパンチ式低速ペレット入射装置の3つのペレット入射装置から構成され、これらを相補的に用いることによって、大容量かつ高繰り返し回の固体水素ペレット粒子供給を可能とした。主装置である『20連発ペレット入射装置』は安定したペレット入射を可能とするために、冷却部に可動部を持たない「その場生成ニューマチック加速方式」を採用し、小型冷凍機による冷却を行った。本装置では直径3.0, 3.4, 3.8 mmの正円柱形状をした20個の固体水素ペレットを1.2 km/sの速度でプラズマへ入射可能であり、ペレット入射タイミングは、予め射出時間を設定するプリプログラミングと密度と相関がある信号を参照した実時間フィードバック制御を組み合わせる設計とした。その他、先進的なガス入射システム、すなわち、超音速ガスバフ/クラスタービーム入射装置の開発を行い、総

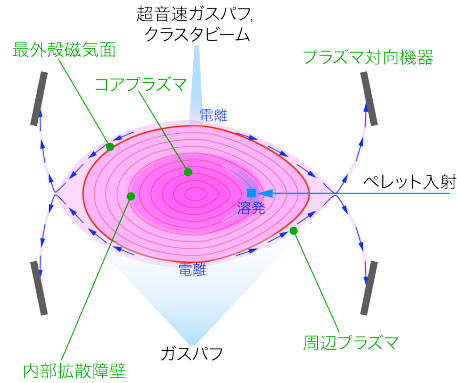


図1 プラズマ断面と本研究で開発粒子供給手段。高温プラズマは、最外殻磁気面より内側の入れ子状の磁気面(図中赤線)によって閉じ込められている。最外殻磁気面の外側は開いた磁場構造となっており、周辺プラズマをプラズマ対向機器で受け止めることによって、粒子排気を行う。効率的な粒子供給のためには、最外殻磁気面の内側のコアプラズマ部に粒子を直接供給することが重要となる。また、本研究で対象とした高密度プラズマには内部拡散障壁が形成されており、この内部には拡散が抑制された高密度領域がある。固体水素ペレット入射を用いた粒子供給によって、内部拡散障壁内への直接粒子供給が可能となる。

合的な高密度プラズマ実験への粒子供給実験を可能とした。図1に本研究で開発した粒子供給手段のプラズマ実験での役割を示した。

### 4-2. 高密度プラズマの定常維持とその閉じ込め特性

内部拡散障壁を持つ超高密度プラズマは集中的なペレット粒子供給によって得られており、これまでの実験ではペレット粒子供給の後の密度減衰フェーズで過渡的に観測されるのみであったが、新たに開発した20連発ペレット入射装置を相補的に用いて追加の粒子供給を行うことによって、内部拡散障壁を持つプラズマを準定常的に維持する実験を行った。その結果、LHDを用いた実験研究によって、内部拡散障壁を有する高密度プラズマの保持時間を大幅伸ばすこと(図2)に成功し、高密度プラズマは固体水素ペレットの連続入射によるコア部への直接粒子供給によつ

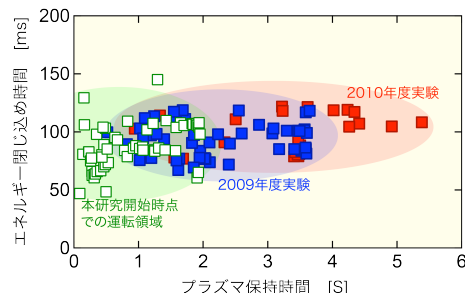


図2 内部拡散障壁を持つ高密度プラズマの保持時間。縦軸はプラズマ性能の指標となる閉じ込め時間。横軸は保持時間を示す。過渡的に得られていた優れたプラズマ特性を維持したまま、保持時間を伸ばすことに成功した。

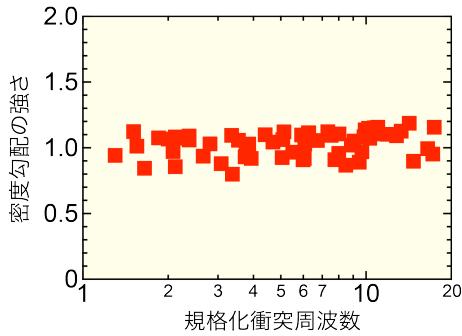


図3 密度勾配の強さの規格化衝突周波数依存性. 1桁以上異なる衝突周波数にわたって、保持できる密度勾配が維持されている.

て、準定常的に維持できることを示した。また、達成できる規格化密度勾配はプラズマの衝突周波数に対して、ほとんど依存性がないことを実験的に示し(図3)、運転温度領域が1桁ほど高くなり、低衝突状態となる核融合プラズマにおいても、本研究で対象とした内部拡散障壁を有する高密度プラズマが外挿できる可能性があることを示した。

これらの高密度プラズマは gyro-Bohm タイプの閉じ込め特性を有して、プラズマの圧力分布は、加熱入力、プラズマ密度、閉じ込め磁場強度で規格化することにより、ベッセル関数で近似される。すなわち、下式を用いて、LHD 実験で得られた規格化圧力分布から、核融合炉における自己燃焼プラズマの分布を外挿することが可能である。

$$p_{\text{nor}}(\rho) = \frac{p_{\text{bp}}(\rho)}{\rho_{\text{bp}}^{0.4} n_{\text{bp}}(\rho)^{0.6} B_{\text{bp}}^{0.8}} = \frac{p_{\text{exp}}(\rho)}{\rho_{\text{exp}}^{0.4} n_{\text{exp}}(\rho)^{0.6} B_{\text{exp}}^{0.8}} \left( = 1.1J_0 \frac{2.4\rho}{1.1} \right)$$

但し、 $p_{\text{nor}}$  は規格化圧力、 $\rho$  は規格化小半径、 $J_0$  はベッセル関数、 $p$  はプラズマ圧力、 $P$  はプラズマへの加熱入力、 $n$  はプラズマ密度、 $B$  は磁場強度を示しており、添字の bp は燃焼プラズマ、exp は LHD プラズマを表している。電子温度とイオン温度は等しいと仮定して、上式を用いて予測した LHD の運転領域の加熱入力依存性を図4に示す。また、LHD 実験

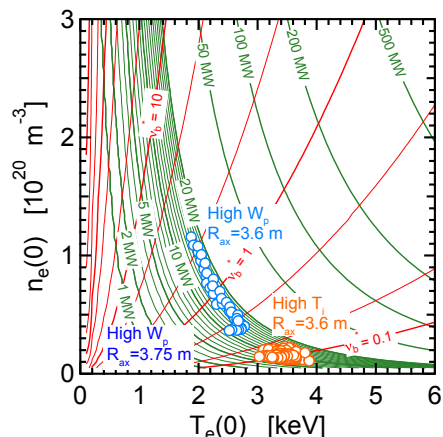


図4 gyro-Bohm タイプの比例則を用いて予測した、加熱入力に対する LHD プラズマが到達し得る温度密度領域. ○は実験値を示す.

で得られた、典型的な高密度実験(高プラズマ蓄積エネルギー( $W_p$ )放電)と低密度実験(高イオン温度( $T_i$ )放電)のデータを○で示した。LHD 実験では 10 - 15 MW 程度の実効加熱入力にて実験を行っており、上式で得られた加熱入力に対する達成温度・密度の等高線は、高密度から低密度まで広い実験領域(衝突周波数 $\nu_b^*$ が0.1から3の範囲)で実験結果と一致している。この直接分布外挿法(DPE)を用いて LHD プラズマ特性を自己燃焼プラズマへ外挿する妥当性として、(i) 核融合炉における自己燃焼プラズマでは $\nu_b^* = 0.5$ 程度での運転になると予測されており、LHD 実験の範囲内であること、(ii) LHD プラズマの加熱パワー密度は、核融合炉におけるアルファ加熱パワー密度とほぼ同様( $\sim 400 \text{ kW/m}^3$ )であることが挙げられる。

#### 4-3. 固体水素ペレットの粒子供給素過程

超高密度プラズマの生成、維持はプラズマ中心部への粒子供給が本質的な役割を果たすことから、高速カメラと分光手法や立体視手法を組み合わせた観測系を用いることによって、(1) 固体水素がプラズマからの入熱で溶発して高密度のプラズモイドを形成する過程と、(2) 高密度プラズモイドが背景プラズマに吸収される過程を観測し、固体水素ペレット粒子供給を理解する上で、プラズマ中のどの場所で固体水素が溶発するかに加えて、溶発プラズモイドの非拡散的な輸送が重要であることを明らかにした。加えて、前者を定量的に理解するために、局所熱平衡を仮定して溶発プラズモイドからの水素発光スペクトルを求める理論計算コードを構築し、後者に関しては溶発プラズモイドの非拡散的輸送の理論モデルの構築をおこなった。溶発プラズモイドの非拡散的輸送機構として、 $\nabla B$  ドリフト電流によって溶発プラズモイド内に形成される電場と閉じ込め磁場に

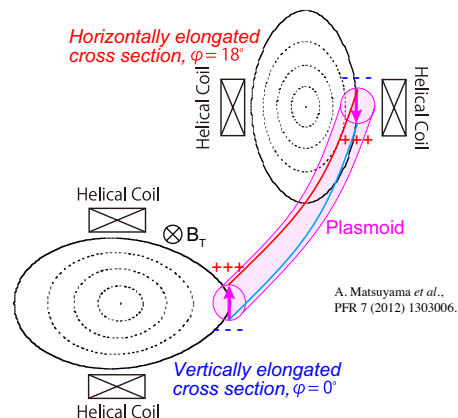


図5 ヘリカル装置における、ペレット溶発プラズモイド内に生じる内部電流。磁力線に沿って伸びるプラズモイド内で磁場勾配の向きが変化するために、 $\nabla B$  電流(矢印)が異なる方向に生じ、プラズモイド内の電場形成が抑制される。

よって、低磁場側に  $E \times B$  ドリフトすることが知られており、トカマク装置では高磁場側からのペレット入射によって実効的な粒子供給効率を改善する燃料供給シナリオが提案されている。一方、ヘリカル装置では、磁場構造の3次元性に起因して、溶発プラズモイド内に生じる  $\nabla B$  ドリフト電流の向きが変化することによって電場をキャンセルする電流が流れ(図5)、溶発プラズモイドの非拡散的輸送が制限されることを明らかにした。この結果から、ヘリカル装置ではペレット入射位置の最適化による実効粒子供給効率改善は限定的であり、高速ペレット入射により、プラズマ中心部へ粒子供給を行うことが適していると考えられる。

#### 4-4. プラズマ対向機器の熱負荷軽減

ダイバータ付近のプラズマを低温化することにより得られる、放射促進ダイバータ・デタッチメント運転の実験を行い、炭素・ネオン・アルゴン等による不純物からの放射損失増大を確認した。各種計測結果と数値シミュレーションの解析から、LHDでは不純物による放射損失は主にストキャスティック領域で起こっていることが明らかになった。これは、通常ダイバータ近傍で放射損失が大きくなるトカマク装置との大きな違いであり、ストキャスティック磁場領域における、磁力線を横切る方向の輸送の促進が原因であると考えられる。

外部摂動磁場を印加して、周辺部の磁場構造を変化させることにより、放射ダイバータをより安定に維持できることを見いだした。これは従来行われてきた不純物放射損失制御の手法、密度・不純物入射量の調整、に加えてあらたな制御方法を追加するものであり、将来の炉設計に対してより柔軟な可能性を付与するという点において極めて重要な成果である。

放射ダイバータ・デタッチメント運転中の不純物の挙動に関しては、少なくとも高Z不純物の閉じ込め領域への蓄積は観測されていない。また、摂動磁場印加による放射ダイバータ運転では、放射損失の増大後に、閉じ込めスケーリングの良化が観測された。これは通常の放射ダイバータ運転とは全く逆の傾向であり、興味深いとともに、好ましい結果である。

#### 4-5. 不純物輸送研究

不純物輸送については、炭素に加えて鉄についても実験計測・数値シミュレーションとの比較解析を行い、周辺部における遮蔽効果を確認した。遮蔽が荷数の違う不純物に対しても働くことが示された。これは、周辺不純物輸送モデルの予測と矛盾しない。また、鉄と炭素の比較から、不純物密度の分布には、

輸送の効果以外に、原子・分子過程も寄与することがわかった。

磁場構造の大きく違うヘリカル装置とトカマク装置の比較を行い、LHDにおける遮蔽効果が、ストキャスティック磁場領域の磁力線幾何学的性質に強く関連していることが明らかになった。

遮蔽効果の定量評価については、不純物の発生量の同定が困難であったために、今後の課題として残された。対策としては、ネオン、アルゴンなど、入射量を制御できる不純物に対して解析を行うことを予定している。

#### 4-6. 燃料供給特性が燃焼特性に及ぼす影響

LHD 実験で観測された、内部拡散障壁を有する高密度・高性能プラズマの閉じ込め特性に4-2で示した物理相似性を適用して、自己燃焼プラズマへ外挿し、プラズマ分布の動態を考慮して、在来型の高温低密度における制御熱核融合点火のシナリオとは異なった、高密度低温で点火を行うために必要な燃料供給条件を調べた。

固体水素ペレット入射による燃料供給法を用いて、尖塔化密度分を持つ高密度自己燃焼プラズマを安定に定常維持できる事を示した。このような尖塔化分布した高密度プラズマを用いた場合、図6に示す様に、(a)平坦密度分布では15 keV必要であった中心温度を10 keVまで減少させ、より低温領域での自己燃焼プラズマの保持が可能であることを示した。(b)更に自己燃焼プラズマの保持に最低限必要な核融合アルファ出力を1 GWから0.7 GWまで減少させることが可能となり、プラズマ対向材料への熱負荷低減等の工学的要求低減の可能性が示された。一方で、核融合出力の変動を5%未満に抑制しつつ尖塔化密度分布を実現するためには、図7に示す様に20 km/s以上の超高速ペレット入射が

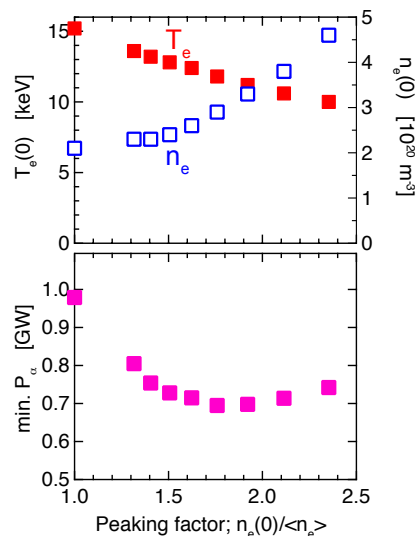


図6 自己燃焼プラズマの密度分布依存性。尖塔化した密度分布ほど運転温度を低くすることができる。

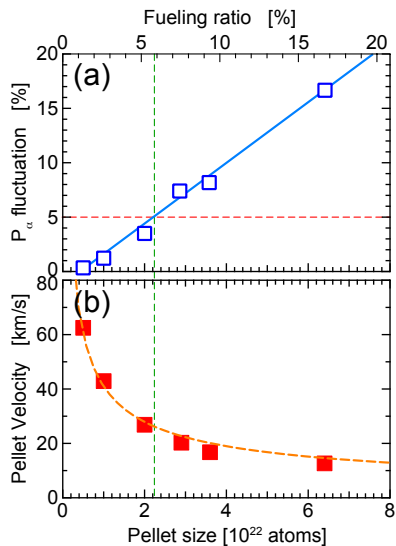


図 7 (a) 核融合出力変動および (b) 必要となるペレット入射速度、のペレットサイズ依存性。

必要条件となる。既存のペレット入射技術で達成可能な最大ペレット入射速度は、技術的に容易なニューマチックガスガン方式や円心加速方式では 1~1.5 km/s 程度、2 段ガスガンでも 4 km/s 以下であり、自己燃焼プラズマへ中心粒子供給を行うためには、今後のペレット入射技術の画期的な進展が求められる。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (全 24 件のうち主要なもの)

1. M. Kobayashi, S. Morita, C.F. Dong, Z.Y. Cui, Y.D. Pan, Y.D. Gao, H.Y. Zhou, Y. Feng, S. Masuzaki, M. Goto, T. Morisaki, H. Yamada (他 4 人), "Edge impurity transport study in the stochastic layer of LHD and the scrape-off layer of HL-2A", Nuclear Fusion, 53 (2013) 033011. (査読有)
2. R. Sakamoto, J. Miyazawa, H. Yamada, S. Masuzaki, A. Sagara, "Pellet fuelling requirements to allow self-burning on a helical-type fusion reactor", Nuclear Fusion 52 (2012) 083006. (査読有)
3. A. Matsuyama, F. Koechl, B. Pégourié, R. Sakamoto, G. Motojima and H. Yamada, "Modelling of the pellet deposition profile and  $\nabla B$ -induced drift displacement in non-axisymmetric configurations", Nuclear Fusion 52 (2012) 123017. (査読有)
4. G. Motojima, R. Sakamoto, M. Goto, A. Matsuyama, J.S. Mishra and H. Yamada, "Imaging spectroscopy diagnosis of internal electron temperature and density distributions of plasma cloud surrounding hydrogen pellet in the Large Helical Device", Review of Scientific Instruments 83 (2012) 093506. (査読有)
5. A. Matsuyama, F. Koechl, B. Pégourié, R. Sakamoto, G. Motojima and H. Yamada, "Modeling of Drift Displacement of the Pellet Ablated Material for Outboard Side Injection in Large Helical Device", Plasma and Fusion Research 7 (2012) 1303006. (査読有)
6. A. Murakami, J. Miyazawa, C. Suzuki, I. Yamada, T. Morisaki, R. Sakamoto and H. Yamada, "Fueling characteristics of supersonic gas puffing applied to large high-temperature plasmas in the Large Helical Device", Plasma Physics and Controlled Fusion 54 (2012) 055006. (査読有)
7. R. Sakamoto and H. Yamada, "Observation of Cross-Field Transport of Pellet Plasmoid in LHD", Plasma and Fusion Research 6 (2011) 1402085. (査読有)
8. J.S. Mishra, R. Sakamoto, A. Matsuyama, G. Motojima and H. Yamada, "Observation of three-dimensional motion of the pellet ablatant in the Large Helical Device", Nuclear Fusion 51 (2011) 083039. (査読有)
9. J.S. Mishra, R. Sakamoto, G. Motojima, A. Matsuyama and H. Yamada, "Design and performance of a punch mechanism based pellet injector for alternative injection in LHD", Review of Scientific Instruments 82 (2011) 023505. (査読有)
10. H. Yamada, M. Kobayashi (25 名中 12 番目), J. Miyazawa (25 名中 16 番目), R. Sakamoto (25 名中 20 番目), "Progress in the Integrated Development of the Helical System", Fusion Science and Technology 58 (2010) 12-28. (査読有)
11. M. Kobayashi, H. Yamada (19 名中 17 番目), "Detachment stabilization with  $n/m=1/1$  resonant magnetic perturbation field applied to the stochastic magnetic boundary of the Large Helical Device", Physics of Plasmas 17 (2010) 056111. (査読有)
12. R. Sakamoto, H. Yamada, M. Kobayashi, J. Miyazawa (他 12 名), "Advanced operational regime with internal diffusion barrier on LHD", Fusion Science and Technology 58 (2010) 53-60. (査読有)
13. R. Sakamoto and H. Yamada, "Development of Advanced Pellet Injector Systems for Plasma Fueling", Plasma and Fusion Research 4 (2009) 002. (査読有)
14. M. Kobayashi, Y. Feng, S. Morita, M.B. Chowdhuri, M. Goto, S. Masuzaki, N. Ohya, T. Morisaki, H. Yamada (他 8 名), "The LHD experimental group, Model prediction of impurity retention in stochastic magnetic boundary and comparison with edge carbon emission in LHD", Journal of Nuclear Materials 390-391 (2009) 325-329. (査読有)

[学会発表] (全 51 件のうち主要なもの)  
<国際会議発表>

1. A. Matsuyama, "Modeling of pellet ablation and homogenization for outboard side injection in the Large Helical Device", 38th European Physical Society Conference on Plasma Physics, June 2011, Strasbourg/France.
2. H. Yamada, "Overview of Results from the Large Helical Device", 23rd IAEA Fusion Energy Conference, October, 2010, Daejeon/Korea.
3. J.S. Mishra, "Observation of three-dimensional motion of pellet ablation in LHD", 37th European Physical Society Conference on Plasma Physics, June 2010, Dublin/Ireland.
4. R. Sakamoto, "Effects of Pellet Fueling and Wall Recycling on Plasma Confinement in LHD (招待講演)", 19th International Conference on Plasma Surface Interactions, May 2010, San Diego/California/USA.
5. M. Kobayashi, "Detached divertor plasma physics with the stochastic magnetic field of LHD (招待講演)", 51st DPP Meeting of The American Physical Society, November 2009, Atlanta/Georgia/USA.
6. J. Miyazawa, "Bessel function model of the electron pressure profile normalized by gyro-Bohm type parameter dependence", Asian Plasma and Fusion Association 2009/Asia-Pacific Plasma Theory Conference 2009, October 2009, Aomori/Japan.
7. H. Yamada, "Achievements and Continued New Phase of Large Helical Device Project (招待講演)", Asian Plasma and Fusion Association 2009/Asia-Pacific Plasma Theory Conference 2009, October 2009, Aomori/Japan.
8. J. Miyazawa, "Heating power dependence of the fusion triple product in high-density internal diffusion barrier plasmas in LHD", 18th International Toki Conference, December 2008, Toki/Japan.

<国内学会発表>

1. 山田弘司, 「新しい点火領域に向けた超高密度プラズマの生成と制御」プラズマ・核融合学会 第 29 回年会, 平成 24 年 11 月, クローバープラザ/福岡県春日市.
2. 坂本隆一, 「高密度点火シナリオを実現するために必要となる粒子供給特性」, プラズマ・核融合学会 第 29 回年会, 平成 24 年 11 月, クローバープラザ/福岡県春日市.
3. 小林政弘, 「共鳴摂動磁場を用いたデタッチメントの安定保持実験」, 第 27 回プラズマ・核融合学会, 平成 22 年 11 月, 北海道

大学.

4. 坂本隆一, 「実時間密度制御性を備えたペレット入射装置の開発と LHD プラズマ実験への適用」, 第 8 回核融合エネルギー連合講演会, 平成 22 年 6 月, 高山市民文化会館.
5. 宮澤順一, 「LHD における高核融合三重積達成の条件」, 第 26 回プラズマ・核融合学会, 平成 21 年 12 月, 京都市国際交流会館.
6. 宮澤順一, 「LHD における高密度内部拡散障壁プラズマの分布形状と閉じ込め改善度」, 第 25 回プラズマ・核融合学会年会, 平成 20 年 12 月, 栃木県総合文化センター.
7. 坂本隆一, 「LHD における固体水素ペレットの溶発挙動と粒子供給特性」, 第 7 回核融合エネルギー連合講演会, 平成 20 年 6 月, 青森市民ホール.
8. 山田弘司, 「ヘリカル方式による核融合科学の構築」, 第 7 回核融合エネルギー連合講演会, 平成 20 年 6 月, 青森市民ホール.

[その他]

ホームページ等:

<http://iis.lhd.nifs.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

山田 弘司 (YAMADA Hiroshi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・教授

研究者番号: 20200735

### (2)研究分担者

坂本 隆一 (SAKAMOTO Ryuichi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号: 10290917

### (3)連携研究者

宮澤 順一 (MIYAZAWA Junichi)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号: 50300728

小林 政弘 (KOBAYASHI Masahiro)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号: 30399307

岡嶋 茂樹 (OKAJIMA Shigeki)

平成 21 年 10 月 22 日～平成 22 年 3 月 31 日

中部大学・工学部・教授

研究者番号: 90113084